

IMPLANTATION D'UNE INSTALLATION DE MATURATION ET D'ELABORATION DE MACHEFERS D'INCINERATION

Muret (31)

MODELISATION DES TRANSFERTS DANS LES SOLS ET LA CHAINE ALIMENTAIRE

Novembre 2024

Réf : SI TOU N°127868 – A1SUMAN

N° Dossier	Agence	Document	Rédigé par	Date	Version	Vérfié par
127868 – A1SUMAN	SI TOU	Modélisation des transferts dans les sols et la chaîne alimentaire	Céline BORDES	18/11/24	Version 2	CBO

127868 – A1SUMAN	SOLER IDE Toulouse	Modélisation des transferts dans les sols et la chaîne alimentaire	Céline BORDES	18/11/24	Version 2
Dossier	Agence	Document	Rédigé par	Date	État

SOMMAIRE

1	CONCENTRATION DANS L'AIR ET DEPOSITION	5
1.1	CONCENTRATION DANS L'AIR – RESULTATS AERMOD	5
1.2	CONCENTRATION DANS L'AIR (PHASE GAZEUSE ET PARTICULAIRE)	6
1.2.1	PRESENTATION DE LA METHODOLOGIE	6
1.2.1.1	Equation de calcul de la fraction de polluant présent sous forme gazeuse F_v	6
1.2.1.2	Concentration de polluant dans la phase particulaire	7
1.2.1.3	Concentration de polluant dans la phase gazeuse	7
1.2.2	RESULTATS DE LA MODELISATION POUR LES SUBSTANCES CONSIDEREES	7
1.2.2.1	Fraction de polluant présent sous forme gazeuse	8
1.2.2.2	Concentration dans la phase gazeuse et particulaire de l'air	8
1.3	DEPOSITION – RESULTAT AERMOD	9
2	TRANSFERT DANS LES SOLS	10
2.1	PRESENTATION DE LA METHODOLOGIE	10
2.2	CONCENTRATION EN POLLUANTS TRACEURS DE RISQUE DANS LES SOLS AU NIVEAU DU RECEPTEUR LE PLUS EXPOSE AUX REJETS DU SITE	16
2.2.1	CALCUL DE L'ATTENUATION DANS LES SOLS	18
2.2.2	CALCUL DU DEPOT TOTAL SUR LES SOLS	19
2.2.3	CALCUL DE LA CONCENTRATION EN POLLUANTS DANS LES SOLS	19
3	TRANSFERT DANS LA CHAINE ALIMENTAIRE	20
3.1	TRANSFERT DANS LA CHAINE ALIMENTAIRE : ANIMAUX D'ELEVAGE	20
3.1.1	EQUATIONS DE TRANSFERTS VERS LES ANIMAUX D'ELEVAGE	20
3.1.2	FACTEUR DE BIOTRANSFERT DANS LA VIANDE ET LES PRODUITS ANIMAUX	21
3.1.3	PARAMETRES RELATIFS AUX ANIMAUX D'ELEVAGE	22
3.1.4	PARAMETRES RELATIFS AUX POLLUANTS CONSIDERES	22
3.1.5	CONCENTRATION EN POLLUANTS TRACEURS DE RISQUE DANS LA VIANDE ET LES ŒUFS	23
3.2	TRANSFERT DANS LA CHAINE ALIMENTAIRE : LEGUMES ET FRUITS	24
3.2.1	EQUATIONS DE TRANSFERT DANS LES LEGUMES ET LES FRUITS	24
3.2.2	CONTAMINATION DES PLANTES PAR VOIE AERIENNE ET/OU TERRESTRE	25
3.2.3	CONCENTRATION DE POLLUANT DANS LA PLANTE LIEE AU TRANSFERT RACINAIRE CRR	26
3.2.4	PARAMETRES RELATIFS AUX VEGETAUX	27
3.2.5	PARAMETRES RELATIFS AUX POLLUANTS CONSIDERES	27
3.2.6	CONCENTRATION EN POLLUANTS TRACEURS DE RISQUE DANS LES PLANTES	28

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Concentrations en polluants traceur de risque par ingestion – Résultats AERMOD.....	5
Tableau 2 : Paramètres de calcul.....	7
Tableau 3: Propriétés des polluants traceurs de risque pour l'ingestion.....	7
Tableau 4 : Fraction de la concentration de polluant dans l'air qui se retrouve dans la phase vapeur.....	8
Tableau 5 : Concentration dans les phases gazeuse et particulaire dans l'air –Récepteur R1.....	8
Tableau 7 : Dépôt au niveau des récepteurs R2/R3 pour les traceurs de risque par ingestion.....	9
Tableau 9 : Paramètres de calcul.....	16
Tableau 10 Paramètres de calcul des substances considérées.....	17
Tableau 11 : Constantes d'atténuation dans les sols.....	18
Tableau 12 : Dépôt total sur le sol lié aux rejets du site – Récepteur R1.....	19
Tableau 14 : Concentrations dans les sols liées aux rejets du site – Récepteur R1.....	19
Tableau 16 : Teneur en graisse des différents types de viande, du lait et des œufs.....	21
Tableau 17 : : Paramètres d'exposition des volailles.....	22
Tableau 18 : Paramètres relatifs aux polluants considérés nécessaires aux calculs des concentrations dans les volailles et dans les œufs.....	22
Tableau 19 : Concentration dans la volaille et dans les œufs résultant des rejets du site (en mg de polluant par kg de produit) – Récepteur 1.....	23
Tableau 21 : Paramètres relatifs aux végétaux.....	27
Tableau 22 : Paramètres relatifs aux polluants considérés nécessaires aux calculs des concentrations dans les végétaux.....	27
Tableau 23 : Concentrations dans les différents types de légumes et dans les fruits (en mg de polluant par g de plante) – Récepteur R1.....	28

1 CONCENTRATION DANS L'AIR ET DEPOSITION

1.1 CONCENTRATION DANS L'AIR – RESULTATS AERMOD

La modélisation de la dispersion atmosphérique, a été réalisée à l'aide du logiciel AERMOD (AMS/EPA REGULATORY MODEL, version de 2023 n°23132), modèle gaussien développé par l'US-EPA (Agence Américaine de Protection de l'Environnement) (voir annexe).

Les résultats de la dispersion atmosphérique sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 1 : Concentrations en polluants traceur de risque par ingestion – Résultats AERMOD

Description	ID	x	y	z	Concentration en µg/m ³			
					As	CrVI	Pb	DIOX.
Point concentrations maximales	MAX	564995,54	6266267,13	164	1,88E-04	9,63E-04	2,88E-02	5,44E-10
Habitation	R1	565312,26	6266330,20	163	3,65E-06	1,78E-05	5,60E-04	1,10E-11
Centre d'incendie et de secours	R2	565120,01	6266316,49	164	7,55E-06	3,84E-05	1,16E-03	2,20E-11
ERP (Salle de sport - RED MONKEY*PARKOUR)	R3	565124,63	6266369,30	164	5,90E-06	2,99E-05	9,06E-04	1,73E-11
Regroupement d'entreprises	R4	565167,76	6266442,36	164	4,86E-06	2,42E-05	7,46E-04	1,44E-11
Entreprise	R5	565067,64	6266186,22	164	1,46E-05	7,44E-05	2,24E-03	4,25E-11
Max récepteurs habitations (uniquement R1 dans le cas présent)					3,65E-06	1,78E-05	5,60E-04	1,10E-11
					R1	R1	R1	R1
Max récepteurs travailleurs					1,46E-05	7,44E-05	2,24E-03	4,25E-11
					R5	R5	R5	R5

Pour évaluer l'exposition des riverains pour la suite de l'ERS (seuls pris en compte pour l'exposition par ingestion), les valeurs obtenues pour des zones habitats les plus exposées (récepteur R1) seront donc utilisées.

1.2 CONCENTRATION DANS L'AIR (PHASE GAZEUSE ET PARTICULAIRE)

1.2.1 PRESENTATION DE LA METHODOLOGIE

1.2.1.1 Equation de calcul de la fraction de polluant présent sous forme gazeuse F_v

Cette donnée a été calculée à partir de l'équation de Junge (1977) recommandée par le guide MPE et le protocole HHRAP :

$$F_v = 1 - \frac{c \times S_T}{P_L^\circ + c \times S_T}$$

Avec :

- F_v : Fraction de la concentration de polluant dans l'air qui se retrouve dans la phase vapeur (-)
- c : Constante de Junge
 - $c = 1,7 \cdot 10^{-4} \text{ atm.cm}$
- S_T : Surface moyenne des particules d'aérosols (en cm^2/cm^3)
- P_L° : Pression de vapeur en phase liquide du polluant (en atm)

La surface moyenne des particules d'aérosols a été estimée par Bidleman (1988) sur la base d'une étude de Whitby (1978) sur la distribution granulométrique des aérosols. Les valeurs de S_T sont indiquées dans le tableau ci-dessous :

Type de bassins atmosphériques	S_T en cm^2 d'aérosols / cm^3 d'air
Bruit de fond continental « propre »	$4,2 \cdot 10^{-7}$
Bruit de fond moyen	$1,5 \cdot 10^{-6}$
Bruit de fond plus sources locales	$3,5 \cdot 10^{-6}$
Zone urbaine	$1,1 \cdot 10^{-5}$

Dans le protocole HHRAP, la valeur de $3,5 \cdot 10^{-6}$ pour le paramètre S_T est recommandée.

$$S_T = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{cm}^3$$

Si le composé est sous forme solide à température ambiante, la pression de vapeur en phase liquide est calculée avec l'équation suivante (Bidleman 1988) :

$$\ln \left(\frac{P_L^\circ}{P_S^\circ} \right) = \frac{\Delta S_f}{R} \times \frac{(T_m - T)}{T}$$

Avec :

- P_L° : Pression de vapeur en phase liquide du polluant (en atm)
- P_S° : Pression de vapeur en phase solide du polluant (en atm)
- ΔS_f : Entropie de fusion
- R : Constante des gaz parfaits
- $\Delta S_f / R = 6,79$ (sans unité)
- T_m : Température de fusion du polluant (en °K)
- T : Température ambiante (en °K)

1.2.1.2 Concentration de polluant dans la phase particulaire

$$C_{pa} = C_{air} \times (1 - F_v)$$

Avec :

- C_{pa} : Concentration de polluant dans la phase particulaire de l'air (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- C_{air} : Concentration de polluant dans l'air (sous forme particulaire et gazeuse) (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- F_v : Fraction de la concentration de polluant dans l'air qui se retrouve dans la phase vapeur (-)

1.2.1.3 Concentration de polluant dans la phase gazeuse

$$C_{va} = C_{air} \times F_v$$

Avec :

- C_{va} : Concentration de polluant dans la phase vapeur de l'air (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- C_{air} : Concentration de polluant dans l'air (sous forme particulaire et gazeuse) (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- F_v : Fraction de la concentration de polluant dans l'air qui se retrouve dans la phase vapeur (-)

1.2.2 RESULTATS DE LA MODELISATION POUR LES SUBSTANCES CONSIDEREES

Les polluants atmosphériques considérés dans l'évaluation des risques sanitaires par ingestion sont :

- Métaux lourds : Arsenic (As), Chrome VI (CrVI), Plomb (Pb) ;
- Dioxines : 2,3,7,8-TCDD.

Tableau 2 : Paramètres de calcul

	Unité	Valeurs
Constante de Junge	en atm.cm	$1,70.10^{-4}$
Surface moyenne des particules d'aérosols	en cm^2/cm^3	$3,50.10^{-6}$

Tableau 3: Propriétés des polluants traceurs de risque pour l'ingestion

	Propriétés physico-chimiques des substances considérées				
	Unité	As	CrVI	Pb	2,3,7,8-TCDD
Constante de Henry	en $\text{atm.m}^3/\text{mol}$	7,73E-1	0	2,50E-2	5,00E-5

Source : Superfund Chemical Data Matrix (SCDM), Last update : July 2022

Si la valeur de H n'est pas disponible, une valeur de 0 a été assignée pour le métal conformément aux données du guide HHRAP.

1.2.2.1 Fraction de polluant présent sous forme gazeuse

Pour les métaux lourds, le protocole HHRAP fixe une valeur de 0 à l'exception du mercure pour lesquels la formule explicitée dans ce document a été utilisée.

Pour les dioxines, la valeur de Fv est également calculée avec la formule explicitée dans ce document en considérant (Source : Base de données HHRAP) :

- Pression de vapeur $V_p = 1,97 \cdot 10^{-12}$ atm
- Température de fusion $T_m = 578,7$ K.

Tableau 4 : Fraction de la concentration de polluant dans l'air qui se retrouve dans la phase vapeur

		As	CrVI	Pb	2,3,7,8-TCDD
Fraction de la concentration de polluant dans l'air qui se retrouve dans la phase vapeur	Fv	0	0	0	6,63E-01

1.2.2.2 Concentration dans la phase gazeuse et particulaire de l'air

Au regard des concentrations dans l'air obtenues à l'aide du logiciel AERMOD, les concentrations dans la phase gazeuse et particulaire calculées sont les suivantes :

Tableau 5 : Concentration dans les phases gazeuse et particulaire dans l'air –Récepteur R1

	Unité	Arsenic	Chrome VI	Plomb	2,3,7,8-TCDD
Air	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	3,65E-06	1,78E-05	5,60E-04	1,10E-11
Concentration dans la phase particulaire de l'air	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	3,65E-06	1,78E-05	5,60E-04	3,70E-12
Concentration dans la phase vapeur de l'air	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	7,30E-12

1.3 DEPOSITION – RESULTAT AERMOD

Le logiciel AERMOD permet également d'atteindre les concentrations annuelles de dépôts au droit des différents récepteurs. Les résultats des calculs des différents termes de déposition sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau 6 : Déposition au niveau du récepteur R1 pour les traceurs de risque par ingestion

	Arsenic	Chrome VI	Plomb	2,3,7,8-TCDD
Dépôt total en g/m ² /an	1,09E-07	7,74E-07	1,67E-05	2,13E-13
Dépôt particulaire sec en g/m ² /an	1,08E-07	7,65E-07	1,65E-05	2,12E-13
Dépôt particulaire humide en g/m ² /an	9,60E-10	8,54E-09	1,48E-07	1,06E-15

2 TRANSFERT DANS LES SOLS

Les méthodologies présentées dans les guides MPE¹ et HHRAP² au niveau du calcul des transferts dans l'environnement sont très semblables.

Toutefois, le modèle HHRAP a été mis à jour récemment (2005) alors que le modèle MPE date de 1998. De plus, les rédacteurs du guide HHRAP se sont notamment appuyés sur le guide MPE. Par conséquent, seront retenues les équations présentées dans le guide HHRAP pour évaluer la concentration en polluants dans le sol.

2.1 PRESENTATION DE LA METHODOLOGIE

1. Equation de calcul de la concentration cumulée dans le sol

a. Cas d'un effet cancérigène

Lorsque la durée d'exposition est incluse dans la durée de fonctionnement de l'installation, la concentration moyenne de polluant dans le sol pendant la période d'exposition se calcule de la façon suivante :

- Pour $T_2 \leq t_D$:

$$C_s = \frac{D_s}{k_s(t_D - T_1)} \left[\left(t_D + \frac{\exp(-k_s t_D)}{k_s} \right) - \left(T_1 + \frac{\exp(-k_s T_1)}{k_s} \right) \right]$$

Si la durée d'exposition est supérieure à la durée de fonctionnement prévue pour l'installation :

- Pour $T_1 < t_D < T_2$:

$$C_s = \frac{\left(\frac{D_s t_D - C_{S_0}}{k_s} \right) + \left(\frac{C_{S_0}}{k_s} \right) (1 - \exp[-k_s (T_2 - t_D)])}{(T_2 - T_1)}$$

b. Cas d'un effet non cancérigène

$$C_{S_0} = \frac{D_s [1 - \exp(-k_s t_D)]}{k_s}$$

Avec :

- C_s : Concentration moyenne de polluant dans le sol pendant la durée d'exposition (en mg de polluant / kg de sol)
- D_s : Dépôts particulaire et gazeux de polluant sur le sol (en mg de polluant / kg de sol / an)
- k_s : Constante d'atténuation de la concentration en polluant dans les sols (en an⁻¹)
- t_D : Temps durant lequel la déposition s'effectue (période de fonctionnement de l'installation) (en année)
- T_1 : Début de la période d'exposition (en année)
- T_2 : Fin de la période d'exposition (en année)
- $C_s t_D$: Concentration dans le sol à l'instant t_D (en mg / kg)

¹ US-EPA, 1998, Methodology for Assessing Health Risks Associated with Multiple Pathways of Exposure to Combustor Emissions (EPA 600/R-98/137)

² US-EPA, September 2005, Human Health Risk Assessment Protocol for Hazardous Waste Combustion Facilities (EPA 530-R-05-006)

2. Calcul de la constante d'atténuation dans le sol

L'atténuation de la concentration en polluants dans le sol est liée à plusieurs phénomènes :

- lixiviation
- ruissellement
- érosion
- dégradation biotique et abiotique
- volatilisation

Ainsi, la constante d'atténuation globale correspond à la somme des constantes d'atténuation propres à chacun des phénomènes cités ci-dessus.

$$k_s = k_{sg} + k_{se} + k_{sr} + k_{sl} + k_{sv}$$

Avec :

- k_s : Constante d'atténuation globale de la concentration en polluant dans les sols (en an^{-1})
- k_{sg} : Constante d'atténuation de la concentration en polluant dans les sols due à la dégradation biotique et abiotique du polluant (en an^{-1})
- k_{se} : Constante d'atténuation de la concentration en polluant due à l'érosion des sols (en an^{-1})
- k_{sr} : Constante d'atténuation de la concentration en polluant dans les sols due au ruissellement (en an^{-1})
- k_{sl} : Constante d'atténuation de la concentration en polluant dans les sols due à la lixiviation (en an^{-1})
- k_{sv} : Constante d'atténuation de la concentration en polluant dans les sols due à la volatilisation du polluant (en an^{-1})

a. Constante d'atténuation de la concentration en polluant dans les sols due à la dégradation biotique et abiotique du polluant

La base de données du protocole HHRAP fournit cette valeur qui est spécifique à un composé considéré.

$$k_{sg} = \text{variable selon le polluant}$$

b. Constante d'atténuation de la concentration en polluant dans les sols due à l'érosion

Conformément aux recommandations de l'US-EPA, les rédacteurs du protocole HHRAP recommande de considérer cette constante comme nulle :

$$k_{se} = 0$$

c. Constante d'atténuation de la concentration en polluant due au ruissellement

$$k_{sr} = \frac{RO}{\theta_{sw} \cdot Z_s} \left(\frac{1}{1 + \left[\frac{Kd_s \cdot BD}{\theta_{sw}} \right]} \right)$$

Avec :

- k_{sr} : Constante d'atténuation de la concentration en polluant dans les sols due au ruissellement (en an^{-1})
- RO : Moyenne annuelle du ruissellement de surface sur les zones perméables (en cm / an)
- θ_{sw} : Volume d'eau contenu dans le sol (en mL d'eau / cm^3 de sol)
- Z_s : Epaisseur de la zone de mélange du sol (en cm)
- Kd_s : Coefficient de partage sol / eau (en mL d'eau / g de sol)
- B_D : Densité du sol (g de sol / cm^3 de sol)

Le coefficient de partage sol / eau est spécifique au polluant considéré. Par contre, les autres paramètres sont abordés dans la page suivante au sein du paragraphe 4 intitulé « Autres paramètres ».

d. Constante d'atténuation de la concentration en polluant due à la lixiviation

$$k_{sl} = \frac{P + I - RO - E_v}{\theta_{sw} \cdot Z_s \left(1 + \left[\frac{Kd_s \cdot BD}{\theta_{sw}} \right] \right)}$$

Avec :

- k_{sl} : Constante d'atténuation de la concentration en polluant dans les sols due à la lixiviation (en an^{-1})
- P : Moyenne annuelle des précipitations (en cm / an)
- I : Irrigation moyenne annuelle (en cm / an)
- RO : Moyenne annuelle du ruissellement de surface sur les zones perméables (en cm / an)
- E_v : Evapotranspiration moyenne annuelle (en cm / an)
- θ_{sw} : Volume d'eau contenu dans le sol (en mL d'eau / cm^3 de sol)
- Z_s : Epaisseur de la zone de mélange du sol (en cm)
- Kd_s : Coefficient de partage sol / eau (en mL d'eau / g de sol)
- B_D : Densité du sol (g de sol / cm^3 de sol)

Le coefficient de partage sol / eau est spécifique au polluant considéré. Par contre, les autres paramètres sont abordés dans la page suivante au sein du paragraphe 4 intitulé « Autres paramètres ».

e. Constante d'atténuation de la concentration en polluant due à la volatilisation

$$k_{sv} = \left(\frac{3.1536.10^{+7} \cdot H}{Z_s \cdot Kd_s \cdot R \cdot T_a \cdot BD} \right) \left(\frac{D_a}{Z_s} \right) \left[1 - \left(\frac{BD}{\rho_{sol}} \right) - \theta_{sw} \right]$$

Avec :

- k_{sv} : Constante d'atténuation de la concentration en polluant dans les sols due à la volatilisation du polluant (en an-1)
- 3.1536.10+7 : Facteur de conversion d'unité (secondes / an)
- H : Constante de Henry (en atm.m³/mol)
- Z_s : Epaisseur de la zone de mélange du sol (en cm)
- Kd_s : Coefficient de partage sol / eau (en mL d'eau / g de sol)
- R : Constante des gaz parfaits où $R = 8,205.10^{-5}$ atm.m³/mol/°K
- T_a : Température ambiante où $T = 298$ °K (soit 25 °C)
- BD : Densité du sol (g de sol / cm³ de sol)
- D_a : Diffusivité du polluant dans l'air (en cm²/s)
- ρ_{sol} : Densité des particules solides (en g/cm³)
- θ_{sw} : Volume d'eau contenu dans le sol (en mL d'eau / cm³ de sol)

Les paramètres spécifiques au polluant considérés sont les suivants : la constante de Henry, le coefficient de partage sol / eau et la diffusivité du polluant dans l'air.

Les autres inconnues sont abordées au sein du paragraphe 4 intitulé « Autres paramètres ».

3. Calcul du dépôt total sur le sol

$$D_s = \left[\frac{100 \cdot Q}{Z_s \cdot BD} \right] \cdot [F_v \cdot (D_{ydv} + D_{yvv}) + (1 - F_v) \cdot (D_{ydp} + D_{ywp})] = \left[\frac{100}{Z_s \cdot BD} \right] \cdot [(D_{dv} + D_{wv}) + (D_{dp} + D_{wp})]$$

Avec :

- D_s : Dépôts particulaire et gazeux de polluant sur le sol (en mg de polluant / kg de sol / an)
- 100 : Facteur de conversion d'unité
- $100 = [10^{+3} \text{ mg / g de polluant}] \cdot [10^{-4} \text{ m}^2 / \text{cm}^2 \text{ de sol}] / [10^{-3} \text{ kg / g de sol}]$
- Q = Flux d'émission du polluant (en g/s)
- Z_s : Epaisseur de la zone de mélange du sol (en cm)
- BD : Densité du sol (g de sol / cm^3 de sol)
- F_v : Fraction de la concentration de polluant dans l'air qui se retrouve dans la phase vapeur (-)
- D_{ypv} = Dépôt gazeux sec annuel moyen unitaire (en $\text{s/m}^2/\text{an}$)
- D_{yvv} = Dépôt gazeux humide annuel moyen unitaire (en $\text{s/m}^2/\text{an}$)
- D_{ydp} = Dépôt particulaire sec annuel moyen unitaire (en $\text{s/m}^2/\text{an}$)
- D_{ywd} = Dépôt particulaire humide annuel moyen unitaire (en $\text{s/m}^2/\text{an}$)
- D_{dv} : Dépôt sec de contaminant sous forme gazeuse (en $\text{g/m}^2/\text{an}$)
- D_{wv} : Dépôt humide de contaminant sous forme gazeuse (en $\text{g/m}^2/\text{an}$)
- D_{dp} : Dépôt sec de contaminant sous forme particulaire (en $\text{g/m}^2/\text{an}$)
- D_{wp} : Dépôt humide de contaminant sous forme particulaire (en $\text{g/m}^2/\text{an}$)

Certains modèles de dispersion fournissent les données de dépôts unitaires réclamées par les équations de calcul fournies par le protocole HHRAP. **Dans le cas présent, le logiciel AERMOD permet d'obtenir le dépôt total en $\text{g/m}^2/\text{an}$.**

Les paramètres « épaisseur de la zone de mélange du sol » et « densité du sol » sont abordés dans la partie ci-après.

4. Autres paramètres

Le calcul de la concentration dans le sol nécessite certains paramètres spécifiques au site étudié :

- l'épaisseur de la zone de mélange du sol (Z_s),
- la densité du sol (BD),
- la densité des particules solides du sol (ρ_{sol}),
- la quantité d'eau disponible dans le sol ($P+I-RO-E_v$),
- le volume d'eau contenu dans le sol (θ_{sw}).

a. *Epaisseur de la zone de mélange du sol*

Le protocole HHRAP distingue deux types de zones différentes :

- soit le terrain considéré est labouré et sert pour des plantations dans ce cas l'épaisseur de la zone de mélange du sol recommandée est : **$Z_s = 20 \text{ cm}$**
- soit le sol n'est pas remué et dans ce cas : **$Z_s = 2 \text{ cm}$** .

b. *Densité du sol*

BD correspond au ratio entre la masse de sol et son volume total. La valeur recommandée par les rédacteurs du protocole HHRAP est :

$$BD = 1,50 \text{ g / cm}^3$$

c. *Densité des particules solides du sol*

La valeur recommandée par le guide HHRAP est basée sur les études de Blake et Hartge (1996) et Hillel (1980) qui suggèrent toutes deux que la moyenne des densités des particules solides du sol est $2,7 \text{ g/cm}^3$.

$$\rho_{sol} = 2,70 \text{ g / cm}^3$$

d. *Quantité d'eau disponible dans le sol (P+I-RO-Ev)*

Les paramètres « Précipitations » et « Evapotranspiration » sont accessibles à partir des données climatiques spécifiques au site étudié (données Météo-France).

Les valeurs pour l'irrigation et le ruissellement sont plus délicats à déterminer.

Concernant l'irrigation, le protocole HHRAP précise que cette valeur est comprise entre 0 et 100 cm/an d'après une étude américaine (Baes et al, 1984).

e. *Volume d'eau disponible dans le sol*

La valeur par défaut recommandée par les rédacteurs du protocole HHRAP est :

$$\theta_{sw} = 0,2 \text{ mL / cm}^3$$

2.2 CONCENTRATION EN POLLUANTS TRACEURS DE RISQUE DANS LES SOLS AU NIVEAU DU RECEPTEUR LE PLUS EXPOSE AUX REJETS DU SITE

Concernant les données météorologiques, les hypothèses suivantes sont considérées :

- précipitations P constatées sur la station Météo France de Toulouse-Blagnac³,
- ruissellement extérieur : 20% P (caractéristiques des espaces verts),
- évapotranspiration moyenne annuelle calculée par Météo France sur la station de Toulouse-Blagnac (ETP Penmann = 1058,4 mm) étant supérieure à la moyenne des précipitations, l'évaporation est donc prise égale à P – RO.

Concernant l'irrigation, ce paramètre sera négligé étant donné la cible étudiée (jardins d'habitations et non zones agricoles) pour ne pas surestimer le facteur d'atténuation de la concentration dû à la lixiviation des sols.

Selon la voie d'exposition considérée, il a été supposé que le dépôt de polluant était homogénéisé sur :

- 2 cm d'épaisseur (sol superficiel ingéré directement par l'Homme),
- 20 cm d'épaisseur (contamination des végétaux par transfert racinaire).

Les paramètres utilisés pour les calculs sont présentés dans le tableau en page suivante.

Tableau 7 : Paramètres de calcul

Paramètres spécifiques au site		
	Unité	Valeurs
Période de fonctionnement de l'installation (t_D)	en années	70
Début de la période d'exposition (T_1)	en années	0
Précipitation annuelle sur le site	en cm/an	62,7
Irrigation	en cm/an	0
Ruissellement (RO)	en cm/an	12,54
Evapotranspiration	en cm/an	50,16
Epaisseur de la zone de mélange (Z_s) – contamination du sol superficiel	en cm	20
Epaisseur de la zone de mélange (Z_s) – contamination du sol racinaire	en cm	2
Autres paramètres (valeurs données par le protocole HHRAP par défaut)		
	Unité	Valeurs
Température ambiante	en °K	298,15
Constante des gaz parfaits	en atm.m ³ /mol/°K	8,21E-05
Densité du sol (BD)	en g/cm ³	1,5
Densité des particules solides du sol	en g/cm ³	2,7
Volume d'eau disponible dans le sol	en mL/cm ³	0,2
Constante d'atténuation en polluant dans les sols due à l'érosion	en an ⁻¹	0

³ Source : Fiche climatologique Météo-France de Toulouse-Blagnac (Statistiques 1991-2020 et records) – Station la plus proche pour laquelle les 2 données, pluviométrie et évaporation potentielle, sont disponibles

Les polluants atmosphériques considérés dans l'évaluation des risques sanitaires par ingestion sont l'arsenic, le chrome VI, le plomb et les dioxines.

Tableau 8 : Paramètres de calcul des substances considérées

	Propriétés physico-chimiques des substances considérées				
	Unité	Arsenic	Chrome VI	Plomb	2,3,7,8-TCDD
Constante de Henry H	atm.m ³ /mol	7,73E-01	0	2,50E-2	5,00E-05
	Pa.m ³ /mol	78 324	0	2 533	5,066
Coefficient de partage sol/eau Kds	en mL/g	29	19	900	3,79E+04
Diffusivité du polluant dans l'air Da	en cm ² /s	0,0772	0	0,0772	0,104
Constante d'atténuation en polluant dans les sols due à la dégradation biotique et abiotique ksg	en an ⁻¹	0	0	0	0,03

Source : Si la valeur de H ou celle de Da n'est pas disponible, une valeur de 0 a été assignée pour le métal conformément aux données du guide HHRAP.

2.2.1 CALCUL DE L'ATTENUATION DANS LES SOLS

Les résultats obtenus pour les différentes constantes d'atténuation sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 9 : Constantes d'atténuation dans les sols

Pour le sol racinaire contaminant par transfert les végétaux						
Phénomène d'atténuation	Constante associée	Unité	Arsenic	Chrome VI	Plomb	Dioxines
Dégradation	ksg	en an-1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,00E-02
Erosion	kse	en an-1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Ruissellement	ksr	en an-1	1,43E-02	2,18E-02	4,64E-04	1,10E-05
Lixiviation	ksl	en an-1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Volatilisation	ksv	en an-1	1,08E+03	0,00E+00	1,13E+00	7,21E-05
TOTAL	ks	en an-1	1,08E+03	2,18E-02	1,13E+00	3,01E-02

Pour le sol superficiel directement ingéré par l'Homme						
Phénomène d'atténuation	Constante associée	Unité	Arsenic	Chrome VI	Plomb	Dioxines
Dégradation	ksg	en an-1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	3,00E-02
Erosion	kse	en an-1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Ruissellement	ksr	en an-1	1,43E-01	2,18E-01	4,64E-03	1,10E-04
Lixiviation	ksl	en an-1	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Volatilisation	ksv	en an-1	1,08E+05	0,00E+00	1,13E+02	7,21E-03
TOTAL	ks	en an-1	1,08E+05	2,18E-01	1,13E+02	3,73E-02

2.2.2 CALCUL DU DEPOT TOTAL SUR LES SOLS

Le résultat du calcul du dépôt total sur les sols pour chacun des composés considérés est présenté dans le tableau ci-dessous :

Tableau 10 : Dépôt total sur le sol lié aux rejets du site – Récepteur R1

		Arsenic	Chrome VI	Plomb	Dioxines
Dépôt total	en g/m ² /an	1,09E-07	7,74E-07	1,67E-05	2,13E-13
Dépôt total (Ds)	en mg/kg/an				
	Sol racinaire	3,62E-07	2,58E-06	5,55E-05	7,10E-13
	Sol superficiel	3,62E-06	2,58E-05	5,55E-04	7,10E-12

2.2.3 CALCUL DE LA CONCENTRATION EN POLLUANTS DANS LES SOLS

Dans le calcul de la concentration des sols en polluants, on considère que la durée d'exposition d'un individu est comprise dans la période de fonctionnement de l'installation (hypothèse majorante).

Les concentrations dans les sols au niveau des zones d'habitations les plus exposées sont présentées dans les tableaux ci-dessous :

Tableau 11 : Concentrations dans les sols liées aux rejets du site – Récepteur R1

		Unité	Arsenic	Chrome VI	Plomb	Dioxines
Concentration dans le sol racinaire	Effet cancérigène	en mg/kg	3,35E-10	5,76E-05	4,87E-05	1,38E-11
	Effet non cancérigène	en mg/kg	3,35E-10	9,25E-05	4,93E-05	2,07E-11
Concentration dans le sol superficiel	Effet cancérigène	en mg/kg	3,35E-11	1,10E-04	4,93E-06	1,23E-10
	Effet non cancérigène	en mg/kg	3,35E-11	1,18E-04	4,93E-06	1,76E-10

3 TRANSFERT DANS LA CHAÎNE ALIMENTAIRE

3.1 TRANSFERT DANS LA CHAÎNE ALIMENTAIRE : ANIMAUX D'ÉLEVAGE

3.1.1 ÉQUATIONS DE TRANSFERTS VERS LES ANIMAUX D'ÉLEVAGE

Les méthodologies présentées dans les guides MPE⁴ et HHRAP⁵ au niveau du calcul des transferts vers les végétaux et les animaux d'élevage sont très semblables. Toutefois, le modèle HHRAP a été mis à jour récemment (2005) alors que le modèle MPE date de 1998 et, les rédacteurs du guide HHRAP se sont notamment appuyés sur le guide MPE. Par conséquent, seront retenues les équations présentées dans le guide HHRAP pour évaluer la concentration en polluants dans les animaux et les végétaux.

Toutefois pour la contamination des animaux d'élevage, les équations présentées dans la méthodologie HHRAP ne prennent en considération que la voie de transfert par ingestion de sol ou d'aliments, la voie par ingestion d'eau contaminée et la voie par inhalation seront donc intégrées dans le calcul à partir des données présentées dans « The Air Toxics Hot Spots Program Guidance Manual for Preparation of Health Risk Assessments »⁶.

L'équation obtenue permet de calculer l'apport journalier de polluant consommé par les animaux d'élevage par ingestion de nourriture contaminée (végétaux), de sols et d'eau contaminée mais également à travers la voie respiratoire. Cette équation inclut le facteur de biotransfert ainsi que le facteur de métabolisme permettant ainsi de transformer la dose journalière de polluant absorbée par l'animal (mg/jour) en une concentration en polluant dans les tissus de l'animal (mg de polluant / kg de tissus) ou dans les produits issus de l'animal (œuf, lait). Cette équation est :

$$A = \left(\sum (F_i \cdot Q_{P_i} \cdot P_i) + F_{eau} \cdot Q_{eau} \cdot C_{eau} + Q_s \cdot C_s \cdot B_s + Q_{air} \cdot C_{air} \right) \cdot Ba \cdot MF$$

Avec : A = Concentration de polluant dans la viande, le lait ou les œufs (mg polluant / kg produit)

- F_i = Fraction de plante de type i poussant sur le sol contaminé et ingéré par l'animal (-)
- Q_{P_i} = Quantité de plantes i consommée quotidiennement par l'animal (kg de matières sèches / jour)
- P_i = Concentration de polluant dans la plante i consommée par l'animal (mg / kg de matières sèches)
- F_{eau} = Fraction d'eau contaminée ingérée par l'animal (sans unité)
- Q_{eau} = Quantité d'eau consommée quotidiennement par l'animal (kg / jour)
- C_{eau} = Concentration de polluant dans l'eau (mg / kg d'eau)
- Q_s = Quantité de sols ingérée par l'animal quotidiennement (kg / jour)
- C_s = Concentration de polluant dans le sol (mg de polluant / kg de sol)
- B_s = Facteur de biodisponibilité de polluant dans le sol (sans unité)
- Q_{air} = Quantité d'air inhalé par l'animal quotidiennement (kg / jour)
- C_{air} = Concentration de polluant dans l'air au niveau du sol (mg de polluant / m³)
- Ba = Facteur de biotransfert du polluant dans la viande, le lait ou les œufs (jour / kg produit)
- MF = Facteur de métabolisme

4 US-EPA, 1998, Methodology for Assessing Health Risks Associated with Multiple Pathways of Exposure to Combustor Emissions (EPA 600/R-98/137)

5 US-EPA, septembre 2005, Human Health Risk Assessment Protocol for Hazardous Waste Combustion Facilities (EPA 530-R-05-006)

6 Office of Environmental Health Hazard Assessment, California Environmental Protection Agency, août 2003, The Air Toxics Spots Program Guidance Manual for Preparation of Health Risk Assessments

Les rédacteurs de la méthode HHRAP recommandent de supposer que 100% des plantes consommées par l'animal ont été cultivées sur un sol contaminé. Cette hypothèse conduit à adopter la valeur par défaut de 1 pour Fi. De la même manière, on considère que toute l'eau ingérée par l'animal est issue d'une source polluée : Feau = 1.

En l'absence de données spécifiques à un polluant donné pour le paramètre de biodisponibilité dans les sols, les rédacteurs de la méthode HHRAP recommandent d'utiliser la valeur de 1 par défaut pour Bs.

Le facteur de métabolisme estime la quantité de polluant qui demeure dans le muscle et dans la graisse. Ce paramètre n'apparaît pas dans l'équation pour la volaille. Pour le bœuf, la vache laitière et le porc, des données sont actuellement disponible uniquement pour le bis(2-ethylhexyl)phthalate (BEHP) où MF = 0,01. Pour les autres polluants, les rédacteurs de la méthode recommandent d'utiliser une valeur de MF de 1.

3.1.2 FACTEUR DE BIOTRANSFERT DANS LA VIANDE ET LES PRODUITS ANIMAUX

Lorsque des données empiriques manquaient pour déterminer le coefficient de biotransfert de composés organiques, une des approches les plus utilisées pour prédire le transfert de milieu environnemental vers la viande ou les produits animaux était le modèle de régression développé par Travis et Arms (1988), qui liait la coefficient de partage octanol – eau au biotransfert dans la viande. Cependant, ces régressions sont entravées par le nombre Kow et questionnent autour de la validité des données de biotransfert.

En réponse, l'US-EPA a développé une nouvelle méthode de prédiction des coefficients de biotransfert. Les rédacteurs de la méthode HHRAP proposent d'utiliser cette méthodologie pour prédire le coefficient de biotransfert des composés organiques :

$$\log Ba_{fat} = -0,099 (\log K_{ow})^2 + 1,07 \log K_{ow} - 3,56$$

Les valeurs de Ba_{fat} sont ajustées de façon à tenir compte de la quantité de graisses contenue dans chaque type de produits comme indiqué ci-dessous :

$$Ba = 10^{\log Ba_{fat} \times T_{graisse}}$$

T_{graisse} représente la teneur en graisse du produit animal considéré, les valeurs proposées par la méthodologie HHRAP sont exposées dans le tableau suivant :

Tableau 12 : Teneur en graisse des différents types de viande, du lait et des œufs⁷

	Source	Bœuf	Lait	Porc	Volaille	Œuf
Teneur en graisse	(HHRAP, 2005)	0,19	0,04	0,23	0,14	0,08

Le coefficient de partage octanol-eau des composés utilisés pour dériver cette équation variait entre -0,67 et 8,2. En conséquence, les rédacteurs de la méthode HHRAP n'utilisent cette équation que pour les composés ayant un log(Kow) compris entre ces deux valeurs. Pour les composés ayant un Kow inférieur à -0,67, ils proposent d'adopter la valeur de Ba obtenue pour un Kow de -0,67 et pour les composés ayant un Kow supérieur à 8,2, ils proposent d'adopter la valeur de Ba obtenue pour un Kow de 8,2.

Pour les composés inorganiques, il faut se référer aux valeurs des facteurs de bioconcentration fournis par substance dans la base de données de HHRAP⁸.

⁷ US-EPA, 1998, HHRAP Companion Database

⁸ US-EPA, 1998, HHRAP Companion Database

3.1.3 PARAMETRES RELATIFS AUX ANIMAUX D'ELEVAGE

Seules les voies d'exposition par ingestion d'œufs et de volaille sont prises en compte dans la présente évaluation des risques sanitaires. Ainsi, seuls les paramètres les concernant sont présentés ci-après.

Les données relatives aux consommations alimentaires ainsi qu'à la capacité respiratoire des différents animaux d'élevage sont fournies dans le tableau suivant :

Tableau 13 : Paramètres d'exposition des volailles⁹¹⁰

	Source	Volaille
Poids (en kg)	(Cal-EPA, 2003)	2
Quantité d'air inhalé (en m ³ /j)	(Cal-EPA, 2003)	0,4
Quantité d'eau ingérée (en kg/j)	(HHRAP, 2005)	0,2
Quantité de fourrage ingérée (en kg de poids sec / jour)	(HHRAP, 2005)	0
Quantité d'ensilage ingérée (en kg de poids sec / jour)	(HHRAP, 2005)	0
Quantité de graines ingérée (en kg de poids sec / jour)	(HHRAP, 2005)	0,2
Quantité de sol ingéré (en kg/j)	(HHRAP, 2005)	0,022

Les paramètres relatifs à la volaille permettront bien sûr d'évaluer la contamination de la viande mais également celle des œufs.

3.1.4 PARAMETRES RELATIFS AUX POLLUANTS CONSIDERES

Les paramètres nécessaires pour le calcul de la concentration de polluants dans les animaux sont présentés dans le tableau ci-dessous (Source : Base de données du modèle HHRAP) :

Tableau 14 : Paramètres relatifs aux polluants considérés nécessaires aux calculs des concentrations dans les volailles et dans les œufs

	Log K _{ow}	Facteur de biotransfert	
		Volaille	Œuf
Arsenic As	0,68	ND	ND
Chrome VI CrVI	Non concerné	ND	ND
Plomb	0,73	ND	ND
2,3,7,8-TCDD	6,8	0,019	0,011

En l'absence de valeurs pour les facteurs de bioconcentration pour l'arsenic, le chrome VI et le plomb, la voie d'exposition par ingestion de volaille et d'œufs ne pourra donc pas être considérée dans cette évaluation des risques sanitaires pour ces polluants traceurs de risque.

⁹ Office of Environmental Health Hazard Assessment, California Environmental Protection Agency, août 2003, The Air Toxics Spots Program Guidance Manual for Preparation of Health Risk Assessments

¹⁰ US-EPA, 1998, HHRAP Companion Database

3.1.5 CONCENTRATION EN POLLUANTS TRACEURS DE RISQUE DANS LA VIANDE ET LES ŒUFS

Les résultats de la modélisation des transferts vers les volailles présentes dans les poulaillers des riverains proches du site sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau 15 : Concentration dans la volaille et dans les œufs résultant des rejets du site (en mg de polluant par kg de produit) – Récepteur R1

Calcul de l'exposition pour la volaille				
	Arsenic	Chrome VI	Plomb	2,3,7,8-TCDD
Par inhalation	1,5E-09	7,1E-09	2,2E-07	4,4E-15
Par ingestion de sols	7,4E-13	2,6E-06	1,1E-07	3,9E-12
Par ingestion d'eau contaminée	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
Par ingestion de graines	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00
Concentration dans la viande de volaille	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	7,5E-14
Concentration dans les œufs	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	4,3E-14

3.2 TRANSFERT DANS LA CHAÎNE ALIMENTAIRE : LEGUMES ET FRUITS

Tout comme dans le cas des animaux d'élevage, les équations développées dans le protocole HHRAP seront utilisées. Cette méthode permet de prendre en considération aussi bien les dépôts secs qu'humides mais également la contamination des sols.

Remarque : En l'absence de modèles fiables à ce jour, la contamination des végétaux par l'eau d'arrosage n'est pas intégrée dans la méthodologie.

3.2.1 EQUATIONS DE TRANSFERT DANS LES LEGUMES ET LES FRUITS

Les plantes aériennes sont supposées pouvoir être contaminées par trois mécanismes différents :

- le dépôt direct de particules (sèches ou humides),
- l'absorption foliaire de polluant sous forme gazeuse par la partie aérienne des végétaux,
- le transfert racinaire à partir du sol.

Dans le cas des végétaux racines, seul ce dernier mécanisme entrera en ligne de compte, l'hypothèse est faite que les racines et les tubercules sont protégés du contact avec les contaminants de la phase gazeuse et avec les particules aériennes.

a. Transferts vers les légumes-feuilles, les légumes-fruits et les fruits

$$C_{p_a} = (C_D + C_v + C_{r_a}) \cdot t_s$$

Avec :

- C_{p_a} = Concentration totale de polluant dans la plante aérienne (mg de polluant / g de plante fraîche)
- C_D = Concentration de polluant dans la plante liée au dépôt particulaire (mg de polluant / g de plante sèche)
- C_v = Concentration de polluant dans la plante liée à l'absorption foliaire (mg de polluant / g de plante sèche)
- C_{r_a} = Concentration de polluant dans la plante aérienne liée au transfert racinaire à partir du sol (mg de polluant / g de plante sèche)
- t_s = Teneur en matière sèche de la plante

b. Transferts vers les légumes-racines

$$C_{p_r} = C_{r_r} \cdot t_s$$

Avec :

- C_{p_r} = Concentration totale de polluant dans la plante racine (mg polluant / g plante fraîche)
- C_{r_r} = Concentration de polluant dans la plante liée au transfert racinaire à partir du sol (mg polluant / g plante sèche)
- t_s = Teneur en matière sèche de la plante

3.2.2 CONTAMINATION DES PLANTES PAR VOIE AERIENNE ET/OU TERRESTRE

1. Concentration de polluant dans la plante liée au dépôt particulaire CD

$$C_D = \frac{Q \cdot (1 - F_v) [D_{ydp} + (F_w \cdot D_{ywp})] R_p [1,0 - e^{(-k_p T_p)}]}{Y_p \cdot k_p} = \frac{[D_{dp} + (F_w \cdot D_{wpp})] R_p [1,0 - e^{(-k_p T_p)}]}{Y_p \cdot k_p}$$

Avec :

- Q = Flux d'émission du polluant (en g/s)
- F_v = Fraction de la concentration de polluant dans l'air qui se retrouve dans la phase vapeur (-)
- D_{ydp} = Dépôt particulaire sec annuel moyen unitaire (en s/m²/an)
- F_w = Fraction du dépôt humide de polluant qui adhère à la surface de la plante (-)
- D_{ywd} = Dépôt particulaire humide annuel moyen unitaire (en s/m²/an)
- D_{dp} : Dépôt sec de contaminant sous forme particulaire (en g/m²/an)
- D_{wpp} : Dépôt humide de contaminant sous forme particulaire (en g/m²/an)
- R_p = Fraction interceptée du dépôt par la partie comestible de la plante (-)
- k_p = Coefficient de réduction de la concentration déposée sur les végétaux par augmentation de la biomasse, érosion par le vent et lessivage (en an⁻¹)
- T_p = Durée d'exposition à la contamination pendant la saison de croissance (en année)
- Y_p = Rendement de la culture (kg de plante sèche/m²)

Certains modèles de dispersion fournissent les données de dépôts unitaires réclamées par les équations de calcul fournies par le protocole HHRAP. Dans le cas présent, ces données ne sont pas disponibles donc, les données sur la déposition présentées précédemment seront utilisées.

La fraction de dépôt humide qui adhère à la surface de la plante est considérée comme égale à 0,2 pour les anions et à 0,6 pour les cations et la plupart des composés organiques, ces valeurs étant les meilleures valables compte tenu des valeurs trouvées dans la littérature scientifique, seule exception : les 3 composés organiques suivants pour qui une valeur de 0,2 est recommandée par les rédacteurs du guide : 4-chloroaniline, n-nitrosodiphenylamine, n-nitrosodi-n-prolyamine.

2. Concentration de polluant dans la plante liée à l'absorption foliaire Cv

$$C_v = Q \cdot F_v \cdot \frac{C_{yv} \cdot B_{va} \cdot VG_a}{\rho_a} = \frac{C_{va} \cdot B_{va} \cdot VG_a}{\rho_a}$$

Avec :

- Q = Flux d'émission du polluant (en g/s)
- F_v = Fraction de la concentration de polluant dans l'air qui se retrouve dans la phase vapeur (-)
- C_{yv} = Concentration moyenne annuelle unitaire de polluant dans la phase gazeuse de l'air (en mg.s/g/m³)
- C_{va} : Concentration de polluant dans la phase vapeur de l'air (en mg/m³)
- B_{va} = Coefficient de biotransfert air-plante (-)
- V_{Ga} = Facteur correctif empirique pour les plantes aériennes (pour tenir compte du transfert réduit des polluants vers l'intérieur de la plante à vocation alimentaire et de la réduction de la contamination due aux techniques de préparation) (-)
- ρ_a = Densité de l'air (en g/m³)

La valeur de C_{vy} peut être obtenue à partir de la modélisation de la dispersion mais dans le cas présent, cette donnée n'est pas disponible, la valeur de la concentration de polluant dans la phase vapeur au droit de la zone la plus exposée sera donc utilisée.

La valeur de B_{va} est disponible à partir de la banque de données de HHRAP.

Concernant la valeur de V_{Ga} , les rédacteurs du protocole recommandent d'utiliser :

- la valeur de 0,01 pour les substances avec un $\log(K_{ow})$ supérieur à 4,
- la valeur de 1 pour celles avec un $\log(K_{ow})$ inférieur à 4.

La densité de l'air recommandée est de 1200,0 g/m³ (densité trouvée pour des températures de 20°C et 25°C).

3.2.3 CONCENTRATION DE POLLUANT DANS LA PLANTE LIEE AU TRANSFERT RACINAIRE CRR

1. Concentration de polluant dans la plante aérienne liée au transfert racinaire à partir du sol C_{ra}

$$C_{ra} = C_s \cdot B_{ra}$$

Avec :

- B_{ra} = Coefficient de biotransfert sol-plante pour les végétaux aériens (-)
- C_s = Concentration de polluant dans le sol (mg de polluant / kg de sol)

La valeur de C_s est obtenue à l'aide des équations précédemment exposées, celle de B_{ra} est disponible pour les différentes substances dans la banque de données de HHRAP.

2. Concentration de polluant dans les légumes racines liée au transfert racinaire à partir du sol C_{ra}

$$C_{rr} = C_s \cdot B_{rr} \cdot VG_r$$

Avec :

- B_{rr} = Coefficient de biotransfert sol-plante pour les légumes racinaires (-)
- C_s = Concentration de polluant dans le sol (mg de polluant / kg de sol)
- VG_r = Facteur correctif empirique pour les plantes racines (pour tenir compte du transfert réduit des polluants vers l'intérieur de la plante à vocation alimentaire et de la réduction de la contamination due aux techniques de préparation) (-)

La valeur de C_s est obtenue à partir de la modélisation des transferts environnementaux comme expliquée précédemment, celle de B_{rr} est disponible pour les différentes substances dans la banque de données de HHRAP.

Concernant la valeur de VG_r , les rédacteurs du protocole recommandent d'utiliser :

- la valeur de 0,01 pour les substances avec un $\log(Kow)$ supérieur à 4,
- la valeur de 1 pour celles avec un $\log(Kow)$ inférieur à 4.

3.2.4 PARAMETRES RELATIFS AUX VEGETAUX

Les valeurs utilisées sont issues de la documentation de la méthode HHRAP ¹¹ (qui se base sur un article de Shor et al. de 1982 sur la production agricole aux Etats-Unis) et, pour la teneur en matière sèche pour les légumes-racines, la donnée est issue de la référence IRSN, 1997 ¹².

Tableau 16 : Paramètres relatifs aux végétaux

Type de plantes	Y_p (kg sec/m ²)	Y_{pT} (kg total/m ²)	t_s (-)	R_p (-)	k_p (an ⁻¹)	T_p (an)
Légumes-feuilles	0,246	2,86	0,086	0,215	18	0,16
Légumes-fruit	10,52	167	0,063	0,996	18	0,16
Légumes-racines	Non appliqué (na)	na	0,2	na	na	na
Fruits	0,252	1,68	0,15	0,053	18	0,16

Avec :

- Y_p = Rendement de la culture (kg de plante sèche/m²)
- Y_{pT} = Rendement de la culture en poids total frais (kg de plante fraîche/m²)
- t_s = teneur en matière sèche des végétaux ($=Y_p/Y_{pT}$)
- R_p : Fraction interceptée du dépôt (-),
- k_p : Coefficient de réduction de la concentration déposée sur les végétaux par augmentation de la biomasse, érosion par le vent et lessivage (an⁻¹),
- T_p : Durée d'exposition à la contamination pendant la saison de croissance (an).

3.2.5 PARAMETRES RELATIFS AUX POLLUANTS CONSIDERES

Les paramètres nécessaires pour le calcul de la concentration de polluants dans les végétaux sont présentés dans le tableau ci-dessous (Source : Base de données du modèle HHRAP) ¹³:

Tableau 17 : Paramètres relatifs aux polluants considérés nécessaires aux calculs des concentrations dans les végétaux

	$\log(K_{ow})$	VGa	VGr	Fw	Bva	Bra	Brr
Arsenic As	0,68	1	1	0,6	NA	0,00633	0,008
Chrome VI CrVI	Non concerné	1	1	0,6	NA	0,00488	0,0045
Plomb Pb	0,73	1	1	0,6	NA	0,0136	0,009
2,3,7,8-TCDD	6,8	0,01	0,01	0,6	$6,55 \cdot 10^4$	0,00455	1,03

¹¹ US-EPA, septembre 2005, Human Health Risk Assessment Protocol for Hazardous Waste Combustion Facilities (EPA 530-R-05-006)

¹² INERIS, Groupe de travail Grande Installation de Combustion du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, juin 2003, Evaluation de l'impact sur la santé des rejets atmosphériques des tranches charbon d'une Grande Installation de Combustion – Partie 2 : Etude de l'exposition par voies indirecte

¹³ US-EPA, 1998, HHRAP Companion Database

3.2.6 CONCENTRATION EN POLLUANTS TRACEURS DE RISQUE DANS LES PLANTES

Les résultats de la modélisation de la contamination des légumes feuilles, des légumes fruits et des légumes racines ainsi que des fruits sont présentés dans les tableaux ci-après :

Tableau 18 : Concentrations dans les différents types de légumes et dans les fruits (en mg de polluant par g de plante) – Récepteur R1

Concentration dans les légumes feuilles				
	Arsenic	Chrome VI	Plomb	2,3,7,8-TCDD
Par dépôt particulaire	5,0E-09	3,5E-08	7,6E-07	9,7E-15
Par absorption foliaire	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	4,0E-15
Par transfert racinaire	2,1E-12	4,5E-07	6,7E-07	9,4E-14
Concentration dans les légumes feuilles	4,3E-10	4,2E-08	1,2E-07	9,3E-15
Concentration dans les légumes fruits				
	Arsenic	Chrome VI	Plomb	2,3,7,8-TCDD
Par dépôt particulaire	5,4E-10	3,8E-09	8,2E-08	1,1E-15
Par absorption foliaire	0,0E+00	0,0E+00	0,0E+00	4,0E-15
Par transfert racinaire	2,1E-12	4,5E-07	6,7E-07	9,4E-14
Concentration dans les légumes fruits	3,4E-11	2,9E-08	4,7E-08	6,3E-15
Concentration dans les légumes racines				
	Arsenic	Chrome VI	Plomb	2,3,7,8-TCDD
Par transfert racinaire	2,68E-12	4,2E-07	4,4E-07	2,1E-13
Concentration dans les légumes racines	5,36E-13	8,3E-08	8,9E-08	4,3E-14
Concentration dans les fruits				
	Arsenic	Chrome VI	Plomb	2,3,7,8-TCDD
Par dépôt particulaire	1,19E-09	8,5E-09	1,8E-07	2,3E-15
Par absorption foliaire	0,00E+00	0,0E+00	0,0E+00	4,0E-15
Par transfert racinaire	2,12E-12	4,5E-07	6,7E-07	9,4E-14
Concentration dans les fruits	1,79E-10	6,9E-08	1,3E-07	1,5E-14



SOLER IDE Toulouse

Bureau d'études et de conseils en Environnement

4, impasse René Couzinet

31500 TOULOUSE

Tél : 05 62 16 72 72